doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.09.039

灌水技术参数对覆膜制种玉米生长与蒸腾耗水的影响

马士萌[1,2]　佟　玲[1,2]　王素芬[1,2]　赵　引[3]　马冬青[1,2]　李德智[1,2]

(1.中国农业大学中国农业水问题研究中心,北京 100083;
2.甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站,武威 733009;
3.滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室,滨州 256600)

摘要:科学高效的灌溉管理是提高水分生产力的关键。针对覆膜前后土壤水热条件有明显差异,灌水参数如何影响作物生长与耗水尚不明确的问题,本研究以制种玉米为研究对象在甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站进行了田间试验。设计 3 种滴头流量 D1(2.0 L/h)、D2(2.5 L/h)、D3(3.0 L/h),5 种灌水间隔时间 P1(6 d)、P2(8 d)、P3(10 d)、P4(12 d)、P5(14 d),探究灌溉方案对覆膜制种玉米生长、产量和蒸腾耗水的影响。结果表明滴头流量较大和灌水间隔时间较小时制种玉米株高与叶面积指数表现更好。D1 处理下,随灌水间隔时间增加株高和叶面积指数呈先增大后减小的趋势,在 P2 取得最大值。籽粒产量与灌水间隔时间呈现显著的二次函数关系,D1、D3 处理下最大值均出现在 P2。灌水间隔时间为 6~10 d 时 D2 可以获得最高的产量。单株日尺度液流速率与小时尺度液流速率均随滴头流量增大而增加,随灌水间隔时间增加而减小。D3 处理小时尺度液流速率峰值比 D2、D1 处理分别增加 85.88%~127.02%、117.80%~151.89%。灌水间隔时间由 P1 增加到 P5 时,小时尺度液流速率峰值降低 23.56%~31.48%。制种玉米蒸腾量随滴头流量增大而增加。一定范围内(P1~P4),增加灌水间隔时间显著降低了全生育期耗水量。灌水间隔时间不大于 10 d 时,D2 耗水量最低,比 D1 降低 1.86%~4.14%,且获得更高的水分生产力。D1、D2 处理均在 P2 处理获得最高水分生产力。为实现高效节水,滴头流量为 2.5 L/h(D2)、灌水间隔时间为 8~10 d 是适宜干旱地区覆膜制种玉米的较优灌水方案,而灌水间隔时间为 6~8 d 时可以实现更高的产量和水分生产力。

关键词:制种玉米;膜下滴灌;灌水技术参数;作物生长;蒸腾耗水

中图分类号:S274.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)09-0396-11　　**OSID**:

Effect of Irrigation Technical Parameters on Growth and Transpiration and Water Consumption of Seed Maize under Film

MA Shimeng[1,2]　TONG Ling[1,2]　WANG Sufen[1,2]　ZHAO Yin[3]　MA Dongqing[1,2]　LI Dezhi[1,2]

(1. *China Agricultural Water Research Center*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *National Field Scientific Observation and Research Station on Efficient Water Use of Oasis Agriculture in Wuwei of Gansu Province*, *Wuwei* 733009, *China*
3. *Key Laboratory of Shandong Province Yellow River Delta Ecology and Environment*, *Binzhou College*, *Binzhou* 256600, *China*)

Abstract: Scientific and efficient irrigation management is the key to improving water productivity. To address the problem that there are significant differences in soil water and heat conditions before and after mulching, and it is still unclear how irrigation parameters affect crop growth and water consumption, field experiments were conducted at the National Field Scientific Observation and Research Station on Efficient Water Use of Oasis Agriculture in Wuwei of Gansu Province, using seed maize as the research object. Three dripper discharges D1 (2.0 L/h), D2 (2.5 L/h), D3 (3.0 L/h), and five irrigation intervals P1 (6 d), P2 (8 d), P3 (10 d), P4 (12 d), P5 (14 d) were designed to investigate the effects of different irrigation management schemes on the growth, yield, transpiration, and water consumption of seed maize. The results showed that higher dripper discharges and shorter irrigation intervals were more

收稿日期:2022-12-22　修回日期:2023-02-07
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1900401)
作者简介:马士萌(1995—),女,博士生,主要从事水文水资源研究,E-mail:shimengm@cau.edu.cn
通信作者:佟玲(1979—),女,教授,博士生导师,主要从事作物绿色高效用水研究,E-mail:tongling2001@cau.edu.cn

favorable for the growth and leaf area index of seed maize. Under D1 treatments, plant height, and leaf area index were increased firstly and then decreased with the increase of irrigation interval, and reached the maximum value at P2. The grain yield showed a significant quadratic relationship with the irrigation interval, and the maximum values under D1 and D3 appeared in P2. When the irrigation interval was 6 ~ 10 d, the highest yield was obtained under the D2 dripper discharge. The daily-scale and hourly-scale liquid flow rates of seed maize single-plant were increased with the increase of dripper discharge and decreased with the increase of irrigation interval. The peak value of the hourly liquid flow rate in D3 treatment was increased by 85.88% ~ 127.02% and 117.80% ~ 151.89% compared with that in D2 and D1, respectively. When the irrigation interval was increased from P1 to P5, the peak value of the hourly liquid flow rate was decreased by 23.56% ~ 31.48%. The transpiration of seed maize was increased with the increase of dripper discharge. Within a certain range (P1 to P4), increasing the irrigation interval significantly reduced the water consumption of seed maize throughout the growth period. At irrigation intervals not greater than P3, D2 had the lowest water consumption, which was 1.86% ~ 4.14% lower than that of D1, and higher water productivity was obtained. The highest water productivity was obtained at P2 treatment for both D1 and D2 dripper discharge. The results showed that the dripper discharge of 2.5 L/h (D2) and the irrigation interval of 8 ~ 10 d were the optimal irrigation scheme for seed maize under film in dry areas for efficient water conservation, while a higher yield and water productivity could be achieved with an irrigation interval of 6 ~ 8 d.

Key words: seed maize; under film drip irrigation; irrigation technical parameters; crop growth; transpiration and water consumption

0　引言

灌溉对我国农业生产和粮食安全保障占有极为重要的地位。尤其在干旱绿洲灌溉农业区,种植业完全依赖于灌溉,水资源不足长期制约着该地区的农业发展。据统计 2020 年我国农业用水仍占据总用水量的 62.1%。而农田灌溉水有效利用系数仅为 0.565,与发达国家还有很大差距[1]。因此充分挖掘农业的节水潜力,提高农业水利用效率对缓解水资源压力具有十分重要的现实意义。

近年来覆膜滴灌技术在干旱地区取得了明显的节水成效[2]。有研究学者表明覆膜会影响土壤水热动态[3],减少地表无效蒸发,从而增加产量,提高水分利用效率[4-6]。因此探究覆膜滴灌下高效节水灌溉制度十分必要。滴头流量与灌水间隔时间是滴灌设计中两个重要的参数,与土壤含水率以及作物根区的湿润体特征有着直接的关系[7-12]。不同灌水条件下形成的湿润体特点不同,湿润体形状对作物耗水有显著的影响。宽浅型土壤湿润体会增加土壤的蒸发,进而影响作物生长发育与蒸发蒸腾量。有研究表明大滴头流量下灰枣的耗水量大于小滴头流量,小滴头流量处理枣果着色品质较优[13]。当灌水量一致时,灌水间隔时间越短,滴头附近土壤含水率越高,水分向四周扩散的梯度差就越大[12]。有关番茄[14]、枸杞[15]、甘蓝[16]等不同作物的研究发现,减小灌水间隔时间可以增加作物的株高、茎粗、叶绿素含量等指标,同时果实品质更优。但田建柯等[17]研究表明玉米的株高、叶面积、产量、水分利用效率随灌水频率的增大均呈现下降趋势。有研究认为灌水间隔时间为 6 d 时可以提高新疆地区覆膜玉米的产量和水分利用效率[18]。在对苜蓿的研究发现,随着灌水频率增加,耗水量呈现先减小后增加的变化趋势[19]。灌水技术参数对作物的影响因土壤环境和作物种类有显著差异,目前关于灌水技术参数对覆膜制种玉米生长耗水的影响研究还比较少,尤其覆膜条件下的响应机制还需进一步探究。作物蒸发蒸腾量是指导作物合理灌溉的重要依据,液流监测能够直接表征植株体内瞬时的水分消耗情况,也可用于估算冠层蒸腾量[20-22]。茎流变化不仅受太阳辐射、温度、饱和水汽压差和相对湿度等气象因素的影响[23-24],还与土壤含水率、土壤温度以及作物生理参数有关[25-27]。龚道枝等[28]利用气象因子与茎流量之间的数量关系预测桃树的蒸腾量,发现液流与参考作物蒸发蒸腾量呈良好的线性关系。在探究玉米[29]、葡萄[30]等作物时发现,利用叶面积指数、茎粗对单株茎流进行尺度转换得到的群体蒸腾量与实测值有很好的一致性。然而覆膜情况下水热条件变化、作物不同尺度液流变化与灌水技术参数的关系还不明确。

河西走廊地区是我国制种玉米的主要产区,可保障全国 50% 的种子使用量[31]。但由于缺乏科学的灌溉指导,实际生产中水分利用效率较低。因此,本文针对西北旱区膜下滴灌灌水技术参数不统一、水分利用效率低的现状,比较不同滴头流量与灌水间隔时间对制种玉米的液流速率以及植株生长状况的影响并将植株蒸腾进行尺度提升,以期揭示制种

玉米的蒸腾耗水以及水分生产力对不同灌水技术参数的响应规律,为探索节水高效膜下滴灌灌溉制度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 4—9 月在甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站进行,该地区属于温带大陆性气候,冬季长夏季短,昼夜温差达 15℃。降水量少,且全年分布不均,多年平均降水量为 164.4 mm,年蒸发量为 2 000 ~ 2 700 mm。但该地区光热充足,全年日照时数可达 3 000 h 以上,大于 0℃年积温为 3 550℃,无霜期 150 d 左右。该地区平均海拔为 1 581 m,地下水埋深超过 25 m。试验区内土壤质地为砂质壤土,深度 0 ~ 100 cm 土层平均土壤干容重为 1.51 g/cm^3,田间持水率为 0.29 cm^3/cm^3,凋萎系数为 0.12 cm^3/cm^3[29]。

1.2 试验设计

本试验供试制种玉米品种为 TRFA2018。采用覆膜滴灌灌溉方式。试验滴头流量设计 3 个水平:2.0、2.5、3.0 L/h,灌水间隔时间设计 5 个水平:6、8、10、12、14 d。其中滴头流量 2.5 L/h 设计 6、10、14 d 3 个灌水间隔时间水平,其他滴头流量与灌水间隔时间采取正交设计,共计 13 个处理,每个处理 3 个重复(表 1)。种植方式为“一膜两带四行”,即 1 幅膜内铺设 2 条滴灌带,播种 4 行作物,作物行距 40 cm,株距 25 cm,滴灌带间距为 80 cm,滴头间距 30 cm,膜宽 140 cm,膜间为裸土,裸土宽 40 cm,试验区面积约 0.38 hm^2。父本母本种植比例为 1∶6,母本于 2018 年 4 月 19 日播种,第 1 批父本于 2018 年 4 月 26 日播种,第 2 批父本于 2018 年 5 月 2 日播种。施肥依据当地种植生产经验确定,氮、磷、钾施肥量分别为 250 kg/hm^2(N)、60 kg/hm^2(K_2O)、165 kg/hm^2(P_2O_5),40% 氮肥作为基施和磷肥、钾肥在播种前施入,60% 在各生育期按作物需肥比例滴施追肥,除草、喷洒农药等农艺措施以当地生产经验为准。

表 1 试验设计

Tab.1 Experiment design

处理	灌水间隔时间/d	滴头流量/(L·h^{-1})
P1D1	6	2.0
P2D1	8	2.0
P3D1	10	2.0
P4D1	12	2.0
P5D1	14	2.0
P1D3	6	3.0
P2D3	8	3.0
P3D3	10	3.0
P4D3	12	3.0
P5D3	14	3.0
P1D2	6	2.5
P3D2	10	2.5
P5D2	14	2.5

1.3 监测指标与方法

1.3.1 气象数据与灌水量

利用标准自动气象站(HOBO, Onset Computer Corp., 美国)对生育期内降雨量 P_e、太阳辐射 R_s、气温、相对湿度、风速等数据进行连续观测,每 15 min 自动记录一次数据。

本试验第 1 次灌水为出苗水,灌水量为 30 mm,5 月 27 日开始第 1 次灌水处理,之后按设计的灌水间隔时间进行灌水。依据 Penman - Monteith 公式[24]计算出各时段内参数作物蒸发蒸腾量 ET_0,ET_0 乘以各生育阶段的作物系数 K_c 再减去该时段的有效降雨量 P_e 确定每次灌水量。不同生育期的作物系数通过对试验站多年玉米覆膜滴灌试验数据计算并拟合回归,按生育期划分进行插值求得。ET_c 为作物需水量。当灌水间隔时段内的有效降雨量大于该时段的作物耗水量时不进行灌水。所有处理全生育期灌水总量相同。生育期划分与灌水量如表 2 所示。

表 2 制种玉米各生育期平均灌水量

Tab.2 Average irrigation amount of seed maize in each growth period

生育期	时间	K_c	ET_0/mm	ET_c/mm	P_e/mm	灌水量/mm
苗期	4 月 20 日—6 月 3 日	0.29	167.70	47.96	6.60	42.62
拔节期	6 月 4 日—7 月 4 日	0.89	127.56	113.53	5.40	103.57
抽穗期	7 月 5 日—7 月 21 日	1.04	69.39	72.17	8.80	57.27
灌浆期	7 月 22 日—8 月 12 日	1.02	88.31	90.07	77.40	39.91
成熟期	8 月 13 日—9 月 11 日	0.80	83.04	66.43	68.60	21.99
全生育期	4 月 20 日—9 月 11 日	0.81	536.00	390.17	166.80	265.36

1.3.2 植株生长指标

各小区随机选取制种玉米母本 5 ~ 6 株,使用卷尺测量株高和每片全展开叶的叶长、叶宽。株高测量从植株地上底部量至叶片最高生长点。叶面积指数计算式为[29]

$$LAI = A_a / A_b = \left(\sum_{i=1}^{n} 0.74 L_i B_{i\max} \right) \Big/ A_b \quad (1)$$

式中 LAI——叶面积指数,cm^2/cm^2

A_a——单株总叶面积，cm^2

A_b——单株占地面积，cm^2

n——单株叶片数

B_{imax}——第 i 片叶片最大宽度，cm

L_i——第 i 片叶片长度，cm

制种玉米进入蜡熟期后开始测产，测产取样时在小区内随机选取 1 行制种玉米，沿滴灌带方向连续取样 20 株，取样重复 3 次，人工脱粒后经干燥箱（85℃）干燥至质量恒定，称取质量，换算至含水率 13%，最终籽粒产量为单株籽粒质量（含水率 13% 时）与密度和出苗率的乘积。

1.3.3 液流速率与蒸腾量

使用包裹式茎流计测量制种玉米植株液流，包裹时间为 7 月中旬，分别在 P1D1、P1D2、P1D3、P3D3、P5D3 处理选取代表处理内玉米长势的母本进行包裹，其中 P1D3、P3D3、P5D3 各设 1 个重复，每隔 7 d 或降雨后拆除重新包裹，每次更换植株时重新根据植株的长势进行参数率定。单株尺度液流速率提升到群体尺度蒸腾量的计算公式为[29]

$$T = \frac{10S_F}{L_A}LAI \tag{2}$$

式中　T——群体蒸腾量，mm/d

S_F——单株液流速率，g/d

L_A——包裹植株单株叶面积，cm^2

1.3.4 作物耗水量

作物耗水量根据水量平衡方程计算，计算公式为

$$ET_t = P_e + I + W - D - R - \Delta W \tag{3}$$

式中　ET_t——t 生长阶段内的耗水量，mm

I——灌水量，mm

W——根区毛管水上升的水量，mm，由于地下水埋深超过 25 m，此项可忽略

D——根区排水量，mm，由于灌水前后 90 ~ 100 cm 的土壤含水率基本保持不变，此项可忽略

R——地表径流量，mm，由于试验地点平坦而且降雨不密集，此项可忽略

ΔW——根区土壤含水量的变化量，mm

式(3)可简化为

$$ET_t = P_e + I - \Delta W \tag{4}$$

有效降雨量采用简化方法计算[32]，计算式为

$$P_e = \sum \delta P_0 \tag{5}$$

式中　P_0——日降雨量，mm

δ——日降雨量有效利用系数

当 $P_0 < 5$ mm，$\delta = 0$；当 5 mm $\leqslant P_0 \leqslant 50$ mm，$\delta = 1$；当 $P_0 > 50$ mm，$\delta = 0.8$。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 处理数据，制作图表，采用 SPSS 21.0（IBM SPSS Statistics，美国）软件进行 Duncan 多范围检验和方差分析（$P < 0.05$）。

2 结果与分析

2.1 灌水处理对植株生长与产量的影响

2.1.1 灌水处理对制种玉米株高的影响

如图 1 所示，母本的株高在苗期增长缓慢，拔节期开始进入快速生长期，抽穗期增长速度又变缓，这是由于母本在拔节期末会进行人工抽雄，株高有整体减小的变化趋势。各处理株高基本都在拔节期达到最大值，最大值在 172.67 ~ 213.75 cm 之间。灌浆期植株底部叶片开始老化脱落，部分上部叶稍变黄、干枯，导致株高逐渐减小。由于前期还未进行灌水处理，各处理的株高在苗期并未出现明显差异，灌水处理开始之后差异逐渐显现。D1 滴头流量下（图 1a），在设计范围内，随着灌水间隔时间增加株高表现为先增大后减小的趋势，在 P2 处理株高取得最大值。D2、D3 滴头流量下（图 1b、1c），拔节期之后灌水间隔时间为 P1、P3 时制种玉米株高在不同生育期的长势都较好。前期玉米的生长发育与种子品质、土壤质地、肥力等多种因素有关，而拔节期是玉米需水量较大的时期，水分成为关键控制因素，这表明此时灌水间隔时间较短时水分条件更优。株高与灌水间隔时间之间没有呈现出显著的规律性变化，这可能是由于 P2D3 试验小区地理位置靠近树木，受遮荫的影响。如图 1d ~ 1f 所示，同一灌水间隔时间处理下，滴头流量越大，对制种玉米的株高越有利。滴头流量为 2.0 L/h 的处理制种玉米株高明显小于另外 2 个滴头流量。P1 处理（6 d）各滴头流量间株高的差异不显著，随着灌水间隔时间的增加，不同滴头流量间差异增大，这可能是由于高频灌溉下土壤水分状况维持在较优水平，减弱了滴头流量对土壤含水率的影响。

2.1.2 灌水处理对玉米叶面积的影响

不同灌水技术参数下制种玉米叶面积指数在全生育期的变化呈现单峰曲线，苗期增长速率较小，拔节期迅速增大，在拔节期末或抽穗期开始时达到峰值，抽穗期后叶面积指数开始减小（图 2）。各处理制种玉米的最大叶面积指数在 3.73 ~ 4.32 cm^2/cm^2 之间。制种玉米需在拔节期末进行人工抽雄，母本的叶面积指数变化曲线有一个明显的折点，抽穗期之后随着植株的老化，叶片从边缘开始逐渐变黄变干，叶面积指数不断减小，成熟期后老化明显加快。

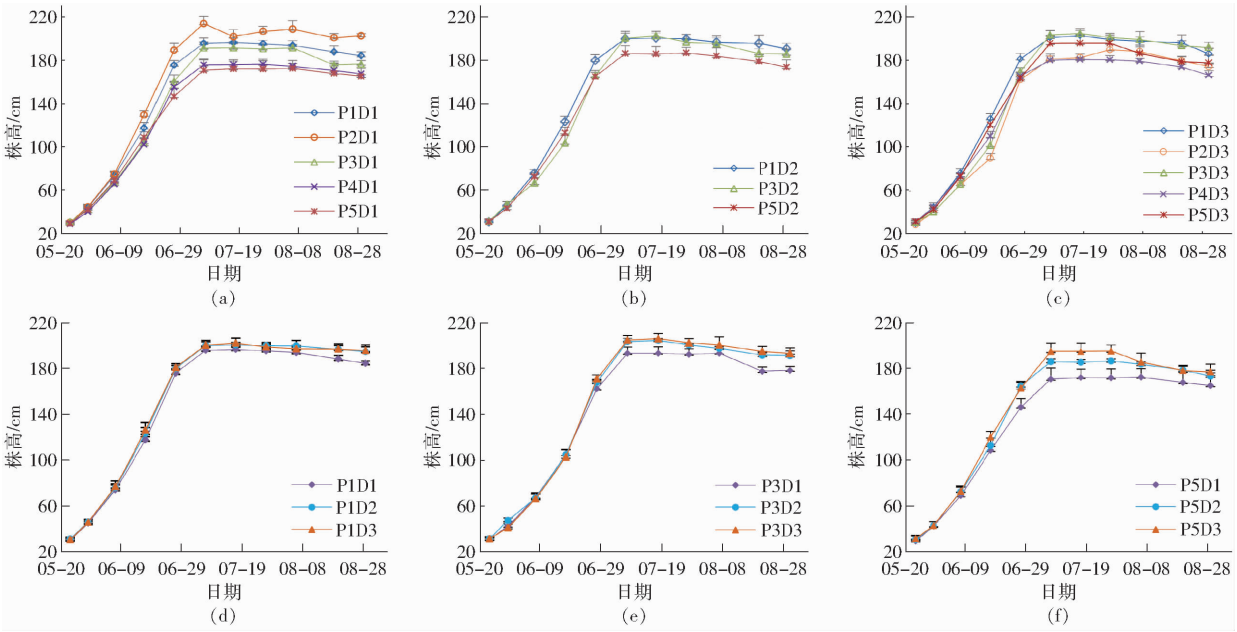

图 1 不同灌水处理制种玉米株高变化曲线

Fig. 1 Variations of plant height of seed maize under different irrigation treatments

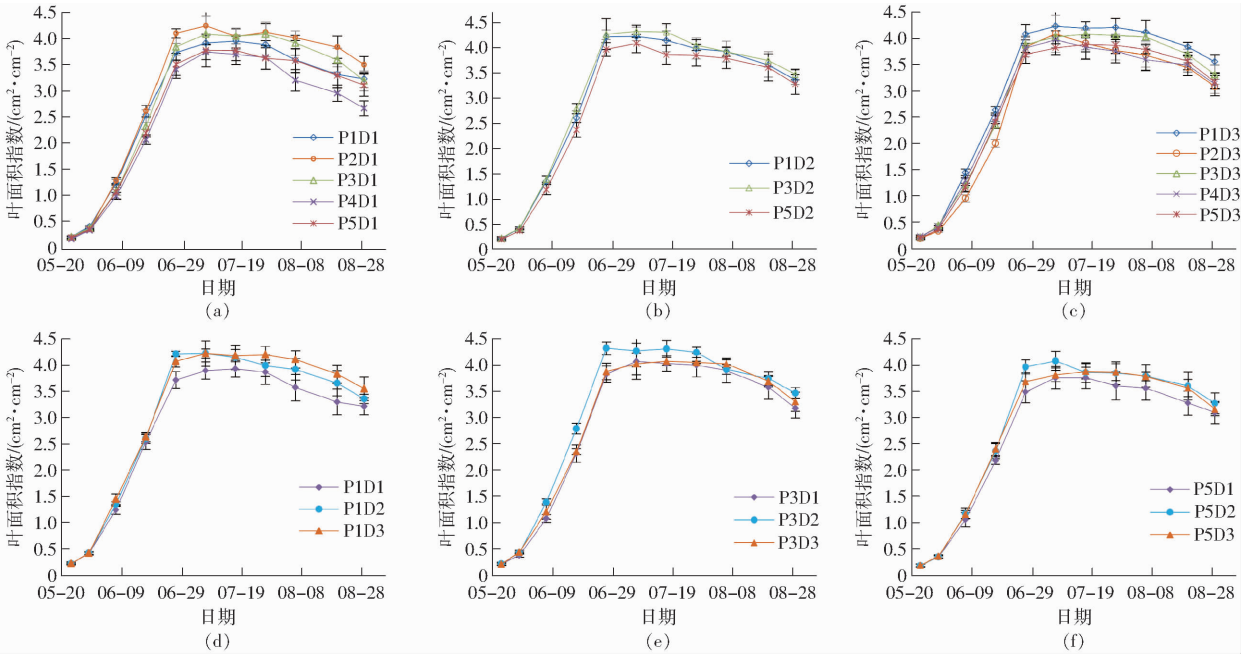

图 2 不同灌水处理制种玉米叶面积指数变化曲线

Fig. 2 Variations of leaf area index of seed maize under different irrigation treatments

制种玉米叶面积指数在不同灌水间隔时间和滴头流量呈现显著的差异性。苗期之后,滴头流量为 D1(2.0 L/h)时,P2 处理(8 d)的叶面积指数明显高于其他灌水间隔时间处理(图 2a)。D2(2.5 L/h)处理中,不同灌水间隔时间下叶面积指数由大到小依次为 P3、P1、P5(图 2b)。但当滴头流量增加到 D3(3.0 L/h)时,P1 处理的叶面积指数超过了 P3 处理(图 2c)。D3 滴头流量下,制种玉米叶面积指数在灌水间隔时间为 8 d(P2)时未取得最高值,可能同样由于树木遮荫的影响。灌水间隔时间一定时,如图 2d ~ 2f 所示,在试验设计范围内,高频灌溉时(P1),拔节期之后滴头流量越大,对叶面积指数越有利。灌水间隔时间超过 10 d(P3)后,叶面积指数由大到小依次为 D2、D3、D1,说明灌水间隔时间与滴头流量间可能存在交互影响。

2.1.3 灌水处理对制种玉米产量的影响

灌水间隔时间为 P1(6 d)、P3(10 d)时,不同滴头流量下制种玉米的籽粒产量没有显著差异,籽粒产量均在滴头流量为 2.5 L/h 时取得较大值,如图 3a ~ 3c(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示。灌水间隔时间增加到 P5(14 d)时,滴头流量对籽粒产量产生了显著影响。

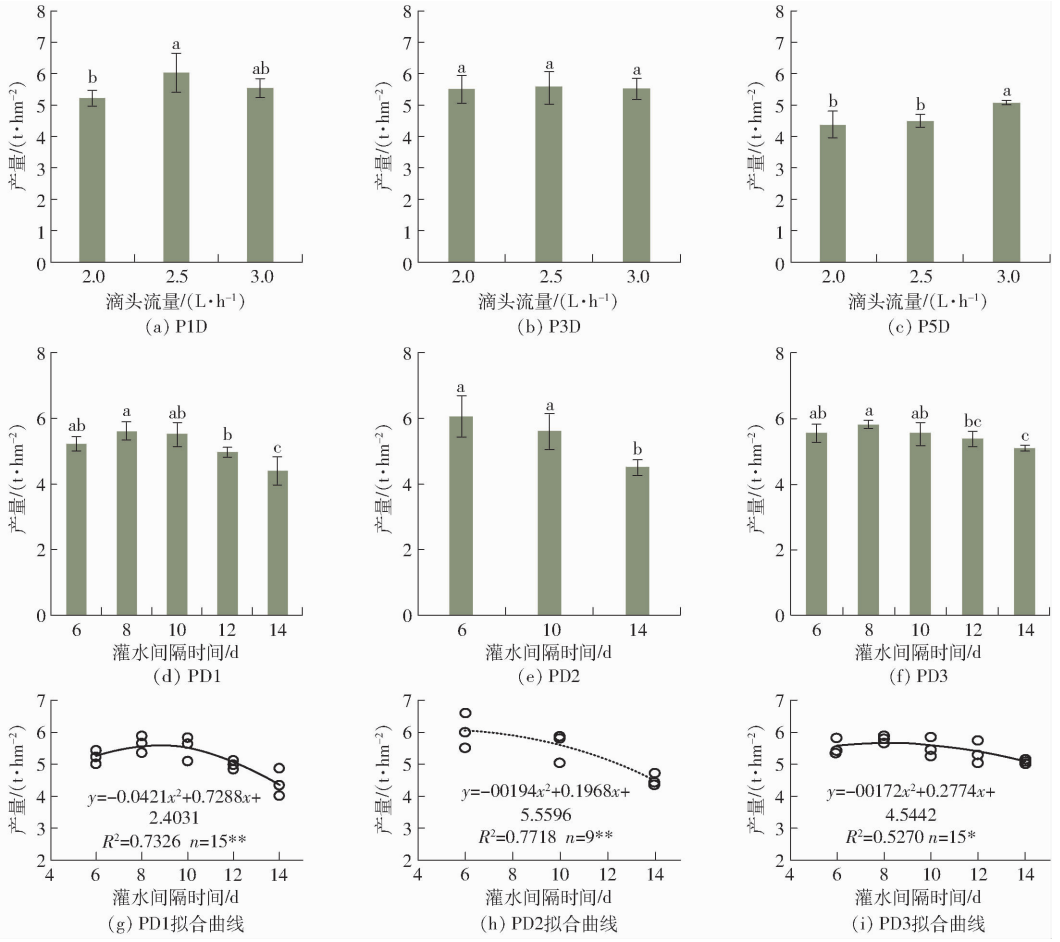

图 3　不同灌水处理对制种玉米产量的影响

Fig. 3　Effects of different irrigation treatments on seed maize yield

随着滴头流量增大，籽粒产量增加，D3 处理产量相比 D1 增加 15.48%。这可能是由于灌水间隔时间较短时，玉米在籽粒形成期处在良好的水分状况中，滴头流量对产量的影响较小；灌水间隔时间增加后，不同滴头流量处理灌水后土壤湿润状况出现明显差异，大滴头流量对肥料的吸收更有利，促进了产量的增加。这一结论与洪明等[33]的研究结果一致。

灌水间隔时间对制种玉米籽粒产量有显著影响，如图 3d～3f 所示。D1(2.0L/h)与 D3(3.0L/h)下，随灌水间隔时间增加，产量先增加后减小。最大值出现在灌水间隔时间为 P2(8 d)的处理，籽粒产量的最大值分别为 5.61、5.80 t/hm^2，这与株高、LAI 随灌水间隔时间变化的规律有很好的一致性。滴头流量为 D2(2.5 L/h)时，3 个灌水间隔时间处理在 P1(6 d)时籽粒产量最大，最大值为 6.04 t/hm^2，当灌水间隔时间增加到 P5(14 d)时，籽粒产量下降 25.49%。拟合回归分析结果表明灌水间隔时间变化与制种玉米籽粒产量呈二次函数关系，如图 3g、3h、3i(图中 * 表示在 $P<0.05$ 水平下，相关性显著；** 表示在 $P<0.01$ 水平下，相关性显著)为灌水间隔时间与籽粒产量的相关关系拟合曲线与方程，不同滴头流量下相关性均较好，其中滴头流量为 D1、D2 处理下相关性达到了极显著水平($P<0.01$)。

2.2　不同时间尺度液流变化

2.2.1　灌水处理对日尺度液流速率的影响

不同灌水处理下制种玉米单株日尺度液流变化存在显著差异。如图 4(图中 R_s 曲线中黑色实心点对应的日期有降雨)所示，由于降雨时茎流计要拆除后重包，数据有若干天的缺失。监测时期内不同处理日尺度单株液流速率在 30.51～734.55 g/d 间变化。随生长期进行，母本单株日尺度液流量呈现波动减小的变化规律，从观测第 1 天到生育期末，单株日尺度液流速率降低 52.68%～78.44%，这表明制种玉米在抽穗期后蒸腾有减弱的趋势。在生长发育后期随着植株衰老，叶片、根系等器官的机能下降，作物的光合作用减弱，因此蒸腾速率也会下降。不同灌水处理下，日太阳辐射 R_s 与制种玉米单株日尺度液流速率达到极值的日期基本一致。随着滴头流量的增大，日单株液流速率有增加的趋势。在观测期间，灌水间隔时间为 P1 的处理液流量均处在较高值，而当灌水间隔时间增加时，制种玉米单株日尺度液流速率有减小的趋势。这主要是由于灌水间隔

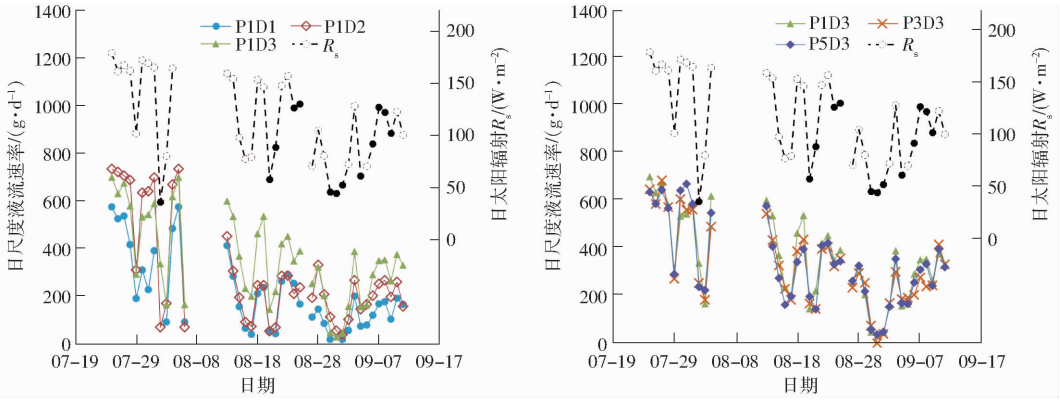

图 4 不同灌水处理下单株日尺度液流速率变化曲线

Fig. 4 Variations of liquid flow rate per plant at daily scale under different irrigation treatments

时间较短时,土壤水分状况较好,促进了作物的蒸腾作用。变化曲线中的极小值一般出现在阴雨天,此时无强烈的太阳光照,由此可以看出液流速率直接受气象因素的影响。降雨过后液流速率会逐渐增加。这是由于降雨后土壤含水率升高,在大气蒸腾引力相同的条件下,土壤含水率也制约着制种玉米液流速率。

2.2.2 灌水处理对小时尺度液流的影响

在数据采集日期中随机选取连续 3 d 来观察制种玉米小时尺度的液流变化,结果表明小时尺度液流速率变化与太阳辐射变化呈明显的正相关(图 5)。在夜间无太阳辐射,液流速率基本为零,说明制种玉米在夜间几乎没有蒸腾作用。有时在夜间依然能观测到较低的液流变化,这是由于白天作物

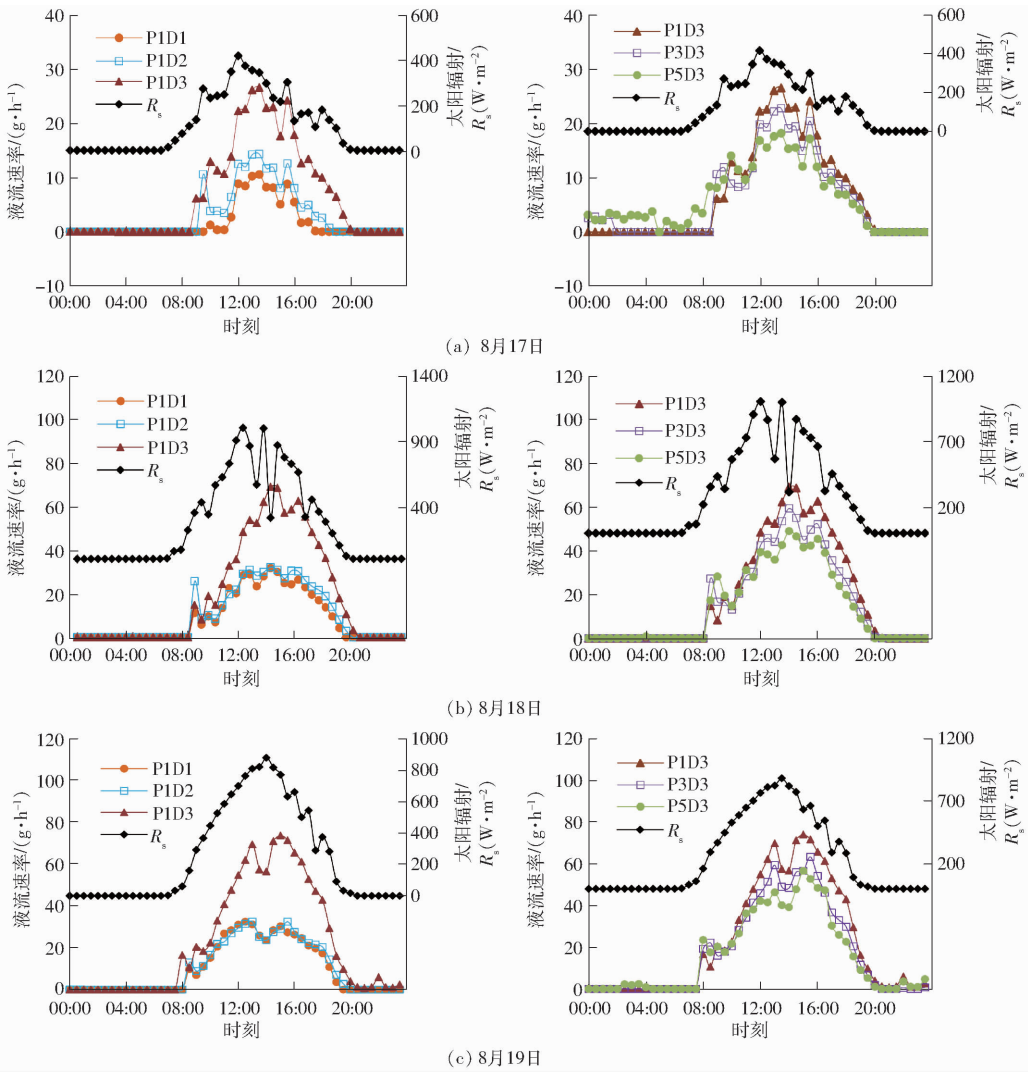

图 5 不同灌水处理下单株小时尺度液流速率变化曲线

Fig. 5 Variations of liquid flow rate per plant at hourly scale under different irrigation treatments

蒸腾剧烈时，会破坏植株体内原有的水分平衡，夜间根系会主动从土壤中吸水来补充流失的水分。日间液流开始时间比太阳辐射出现的时间滞后约 90 min，同时液流速率达到峰值的时间比最大太阳辐射晚 90 min 左右。早晨太阳辐射较弱，气温低，液流速率较小，随太阳辐射的增强，温度升高，液流速率迅速增大。不同滴头流量处理下液流速率均在 12:00—14:00 达到峰值，之后太阳辐射减弱，温度降低，液流速率减小。可以看出滴头流量的增大显著增加了植株日间液流速率，17—19 日中 D3 滴头流量处理液流速率的峰值比 D2、D1 分别增加 85.88% ~127.02%、117.80% ~151.89%。这种变化规律在观测时期内有普遍性。不同灌水间隔时间处理液流速率基本在同一时间达到峰值，当灌水间隔时间由 6 d(P1)增加到 14 d(P5)时，制种玉米小时尺度液流速率呈现减小的趋势，峰值点降低 23.56% ~31.48%。15:00 左右不同处理的液流速率均有短暂的下降。这是由于在温度较高的中午，植物会关闭气孔来保存自身的水分，失去蒸腾牵引力作用而导致液流速率下降。

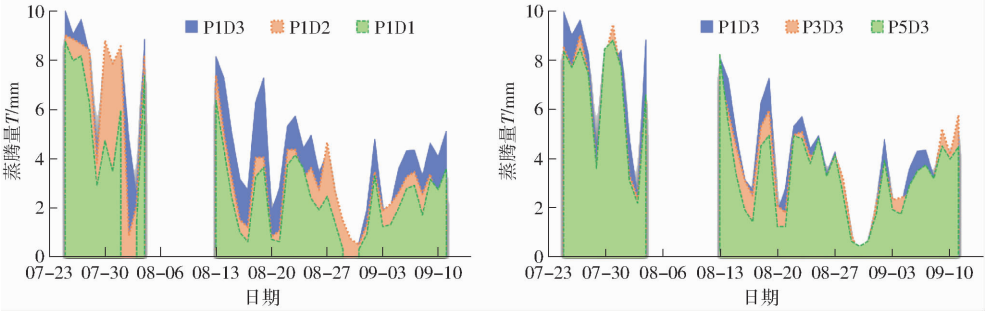

图 6　不同灌水处理下制种玉米蒸腾量

Fig. 6　Changes in transpiration of seed maize under different irrigation treatments

滴头流量较大时，灌水过程中水分来不及下渗易形成地面积水，从而干扰了灌水间隔时间改变对土壤含水率造成的影响。

2.3.2　不同灌水处理对耗水量的影响

灌水间隔时间与滴头流量对制种玉米耗水量和水分生产力的影响都达到了显著性。如图 7a 所示，灌水间隔时间为 P1 ~ P4 时，随灌水间隔时间增加，制种玉米的全生育期耗水量均出现显著下降。而灌水间隔时间增加到 P5 时，各处理耗水量均有一定程度的增加。这一结果可能是由于当灌水间隔时间超过 12 d 时，进行灌溉时土壤表层含水率迅速达到饱和，抑制了水分的下渗，灌水后地表易产生大面积积水，从而增大了土壤蒸发等非生产力损失。研究结果还表明 D1 处理耗水量明显高于其他 2 个滴头流量。灌水间隔时间不大于 10 d 时，D2 可以获得更低的全生育期耗水量。与 D1 相比，D2 处理下制种玉米的耗水量降低 1.86% ~4.14%。所有灌水技术参数组合中 P1D1 处理的全生育期耗水量最大，为 373.31 mm，P4D3 处理下耗水量最小，为 345.70 mm。在 D1、D3 处理下，灌水间隔时间为 P4 的处理相比 P1 处理耗水量也分别减少 4.65%、5.47%。且 D1、D3 处理下水分生产力随灌水间隔时间增加表现出先增加后减少的趋势，在 P2 处理取得最大值，分别为 1.52、1.58 kg/cm^3。3 个滴头流量中 D2、D3 可以使制种玉米获得更高的水分生产力。综合耗水量和水分生产力表现，灌水间隔时间为 8 ~ 10 d 和滴头流量为 2.5 L/h(D2)可以在降低农业耗水的同时保证作物生产力。这一结果与 MA 等[34]基于产量与水氮利用效率的灌溉制度优化结论一致。

2.3　灌水处理对玉米蒸腾耗水的影响

2.3.1　不同处理下制种玉米日蒸腾动态

日尺度的液流速率与土壤含水率、叶面积指数以及茎粗均有显著相关性。本文选取叶面积指数对单株蒸腾量进行尺度提升，群体蒸腾量变化如图 6 所示。液流监测时间主要在制种玉米的灌浆期和成熟期，灌浆期不同处理制种玉米日蒸腾量在 0.89 ~ 10.03 mm 之间，成熟期日蒸腾量为 0.32 ~ 8.26 mm。从 7 月底开始，制种玉米母本田间日蒸腾量呈波动减小的变化趋势，变化曲线中极小值的拐点出现在阴雨天气，在 8 月 28 日—9 月 2 日蒸腾量一直处于波谷的原因可能是由于该时期内出现了连续的阴雨天气，抑制了制种玉米的蒸腾作用。灌水间隔时间为 P1 时，制种玉米灌浆期之后不同滴头流量处理日蒸腾量由大到小基本表现为 D3、D2、D1，表明在高频灌溉下，增大滴头流量会导致制种玉米蒸腾量增加。而在 D3 滴头流量下，P1 处理表现出较高的蒸腾量，但不同灌水间隔时间与田间蒸腾量未表现出显著相关性，特别是在灌浆期结束前。这可能是由于植株蒸腾受土壤含水率的显著影响，当

3　讨论

不同的滴头流量和灌水间隔时间会带来土壤温

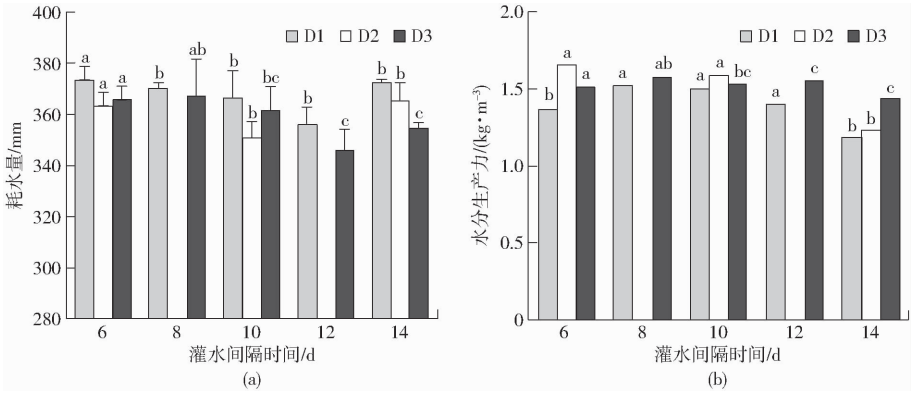

图 7 不同灌水处理下制种玉米全生育期耗水量和水分生产力

Fig. 7 Water consumption throughout growth period and water productivity of seed maize under different irrigation treatments

度和水分动态的差异,影响作物的根系吸水、蒸腾和光合作用,进而影响作物的生长和产量。田建柯等[17]对夏玉米的研究结果表明,随灌水频率从 3 d 增加到 9 d,玉米的株高、叶面积、干物质量和产量均呈下降趋势。本文分析制种玉米的生长状况发现,灌水间隔时间小于 10 d(P3)时株高明显高于其他灌水间隔时间,且在 D1 处理中可以看到在灌水间隔时间为 8 d(P2)时株高取得最大值,并且在叶面积指数中也得到了相似的结果。不同灌水间隔时间与制种玉米的籽粒产量呈现二次函数关系,D1 和 D3 处理下产量最大值均出现在灌水间隔时间为 8 d 的处理,所有处理中灌水间隔时间为 6 ~ 10 d 时可以获得相对较高的产量。这表明灌水间隔时间并不是越短越好,在 6 ~ 10 d 间存在一个最优的区间。这是由于同一灌水量时,高频灌溉处理 0 ~ 20 cm 土层的含水率较高,不利于水分的下渗和水平扩散,易导致水分分布不均匀[35],进而会影响作物的生长。这与田建柯等[17]关于夏玉米的研究结果不同。D2、D3 处理下制种玉米株高和叶面积指数和产量都显著优于 D1。从生长指标和产量的表现来看灌水间隔时间为 6 ~ 10 d、滴头流量为 2.5 L/h 和 3.0 L/h 均是较优的方案。

植株液流速率可以反映蒸腾强度,滴头流量增大会促进日尺度液流速率增加,即增加日单株液流流量,同时小时尺度液流速率的峰值也增加;而增加灌水间隔时间,日尺度液流速率和小时尺度液流速率的峰值都有降低的趋势。这反映了较大滴头流量和较短灌水间隔时间时植株的蒸腾作用更强烈。这是由于作物蒸腾与根系吸水过程密切相关,滴头流量较大时,灌水后土壤湿润体偏宽浅,土壤水分和根系分布更为均匀,对根系的生长更有利[36-37]。灌水间隔时间越长,灌水前土壤表层干燥面积越大,灌水后被湿润的土壤面积越大[38],土壤含水率在湿润体内的分布梯度差相对较小,会降低作物根系向植株体输送水分以及养分的效率[39]。从蒸腾量和耗水变化来看,增大滴头流量会增加制种玉米蒸腾量。灌水间隔时间不大于 10 d 时,滴头流量 2.5 L/h(D2)下耗水量最低,而且可以获得更高的水分生产力。不同灌水间隔时间中 12 d(P4)的耗水量最少,从 6 d 增加到 12 d 时耗水量逐渐减小,但在 D1、D3 处理下灌水间隔时间为 8 d(P2)和 10d 时水分生产力比其他灌水间隔时间下更高,且基于 D1、D3 处理的试验结果表明灌水间隔时间与制种玉米的籽粒产量呈现显著二次函数关系,P2 处理取得最大值。基于拟合趋势,D2 处理下最佳灌水间隔时间也将出现在 8 d 左右。李菊等[40]在河西地区关于春玉米的研究中也得到了灌水间隔时间为 8 d 时水分生产力较高的结果。综合研究结果,从单因素分析来看滴头流量的最佳选择为 2.5 L/h(D2)。虽然 P1D2 的灌溉方案获得了最高的产量和水分生产力,但是与 P3D2 相比产生了更大的耗水量。所以从农业高效节水的角度,滴头流量 2.5 L/h 与灌水间隔时间 8 ~ 10 d(P2、P3)的组合是适宜干旱地区覆膜制种玉米的较优灌溉方案。若以增产和提高水分生产力为目标,P1D2 组合表现最优,滴头流量为 2.5 L/h(D2),灌水间隔时间为 6 ~ 8 d 的灌溉方案是较优选择。

4 结论

(1)D1 处理下,增加灌水间隔时间时株高和叶面积表现为先增大后减小的变化趋势,在 P2 处理取得最大值。D2、D3 处理下,灌水间隔时间不超过 10 d 时制种玉米株高和叶面积指数都表现较好。3 个设计滴头流量中 D2、D3 灌水处理下制种玉米的生长状况更优。

(2)灌水间隔时间较短时籽粒产量在滴头流量为 2.5 L/h 时取得较大值,不同处理间没有显著差异。灌水间隔时间增加到 14 d 后出现显著差异,大滴头流量更有助于增加产量。随灌水间隔时间增加

制种玉米籽粒产量呈现显著的二次函数变化。

(3)较大滴头流量和较小灌水间隔时间下制种玉米的蒸腾作用明显增强。单株日尺度液流速率与单株小时尺度液流速率均随着滴头流量的增大而增加,随灌水间隔时间增加而呈现减小趋势。

(4)高频灌溉下,增大滴头流量会导致制种玉米的蒸腾量增加。灌水间隔时间为 6 ~ 12 d 时,增加灌水间隔时间可以显著降低制种玉米的全生育期耗水量。灌水间隔时间增加到 14 d 时,耗水量反而增加。D2、D3 处理下制种玉米可以获得更少的耗水和更高的水分生产力,灌水间隔时间不超过 10 d 时,D2 表现更优。水分生产力随灌水间隔时间增加表现出先增加后减少的趋势,在 P2 处理取得最大值。综合研究结果,以农业高效节水为目标,滴头流量为 2.5 L/h(D2)、灌水间隔时间为 8 ~ 10 d(P2、P3)是适宜干旱地区覆膜制种玉米的较优灌溉管理方案组合;从提高产量和水分生产力的角度,灌水间隔时间为 6 ~ 8 d 更优。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国水利部. 2020 年中国水资源公报[R/OL]. [2021 - 07 - 13] http://www.gov.cn/xinwen/2021 - 07/13/content_5624515.htm.

[2] 连彩云,马忠明. 宽窄行配置一穴多株种植对膜下滴灌玉米产量和群体质量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 37 - 45.
LIAN Caiyun, MA Zhongming. Effects of more plants per hole on yield and population quality of spring maize with wide-narrow allocation under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 37 - 45. (in Chinese)

[3] 张友良,李躲,冯绍元,等. 覆膜滴灌紫薯农田水热传输规律及其对环境因子的响应[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 330 - 340.
ZHANG Youliang, LI Duo, FENG Shaoyuan, et al. Water and heat transfer and its response to environmental factors in drip irrigated purple potato field with film mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 330 - 340. (in Chinese)

[4] LIU Q, CHEN Y, LIU Y, et al. Coupling effects of plastic film mulching and urea types on water use efficiency and grain yield of maize in the Loess Plateau, China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 157: 1 - 10.

[5] 任新茂,孙东宝,王庆锁. 覆膜和种植密度对旱作春玉米产量和蒸散量的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 206 - 211.
REN Xinmao, SUN Dongbao, WANG Qingsuo. Effects of plastic film mulching and plant density on yield and evapotranspiration of rainfed spring maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 206 - 211. (in Chinese)

[6] 赵引,毛晓敏,段萌. 覆膜和灌水量对农田水热动态和制种玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 275 - 284.
ZHAO Yin, MAO Xiaomin, DUAN Meng. Effects of film mulching and irrigation amount on farmland water-heat dynamics and growth of seed-maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 275 - 284. (in Chinese)

[7] BENASHER J, CHARACH C, ZEMEL A. Infiltration and water extraction from trickle irrigation source: the effective hemisphere model[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(4): 882 - 887.

[8] BRESLER E. Analysis of trickle irrigation with application to design problem[J]. Irrigation Science, 1978, 1(1): 3 - 17.

[9] 王平,胡笑涛,乔林然,等. 流量与湿润比对湿润体特性影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(11): 11 - 15.
WANG Ping, HU Xiaotao, QIAO Linran, et al. Effect of dripper discharge and design wetted soil percentage on wetted body and soil moisture distribution[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(11): 11 - 15. (in Chinese)

[10] 王平. 滴灌湿润比对土壤水分分布及玉米生长生理指标影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
WANG Ping. Effects of wetted percentage on soil water distribution and growth and physiological index of maize[D]. Yangling: Norwest A&F University, 2016. (in Chinese)

[11] 李明思,康绍忠,孙海燕. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 32 - 35.
LI Mingsi, KANG Shaozhong, SUN Haiyan. Relationships between dripper discharge and soil wetting pattern for drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(4): 32 - 35. (in Chinese)

[12] 王振华,郑旭荣,任杰,等. 灌水频率对地下滴灌线源入渗土壤水分运动规律影响的试验研究[J]. 水利学报, 2007(增刊 1): 299 - 302.
WANG Zhenhua, ZHENG Xurong, REN Jie, et al. Study on effects of irrigation frequency on soil water-transport of line source permeation under subsurface drip irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(Supp.1): 299 - 302. (in Chinese)

[13] 游磊. 灌水定额和滴头流量对南疆灰枣产量和品质影响研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2015.
YOU Lei. Effect of irrigation quota and dripper discharge on yield and quality of grey jujube in southern Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[14] 祁娟霞,刘馨,赵小兵,等. 不同灌水量和灌水频率对番茄植株生长、光合与荧光特性的影响[J]. 节水灌溉, 2017(4): 50 - 56.
QI Juanxia, LIU Xin, ZHAO Xiaobing, et al. Effects of different irrigation amount and irrigation frequency on the growth,

photosynthesis and fluorescence characteristics of tomato[J]. Water Saving Irrigation, 2017(4): 50 - 56. (in Chinese)
[15] 郑国保,张源沛,朱金霞,等. 灌水频率对枸杞品质、产量和耗水特性的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(31): 206 - 210.
ZHENG Guobao, ZHANG Yuanpei, ZHU Jinxia, et al. Research on the quality, yield and water consumption characteristic of *Lyciumbarbarum byirrigation* frequency[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(31): 206 - 210. (in Chinese)
[16] 张恩慧,马勇斌, 程永安,等. 灌水频率对甘蓝抗病性及品质和产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010,38(8): 138 - 142,150.
ZHANG Enhui, MA Yongbin, CHENG Yongan, et al. Effects of irrigation frequency on disease resistance, quality and yield in cabbage[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2010, 38(8): 138 - 142,150. (in Chinese)
[17] 田建柯,张富仓,强生才,等. 灌水量及灌水频率对玉米生长和水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(9): 815 - 822.
TIAN Jianke, ZHANG Fucang, QIANG Shengcai, et al. Effects of irrigation level and frequency on growth and water use efficiency of maize[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(9): 815 - 822. (in Chinese)
[18] ZHANG Guoqiang, SHEN Dongping, MING Bo, et al. Using irrigation intervals to optimize water-use efficiency and maize yield in Xinjiang, northwest China[J]. The Crop Journal, 2019, 7(3): 52 - 64.
[19] 万修福,徐洪雨,何峰,等. 灌水频率对紫花苜蓿耗水规律及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(34): 153 - 158.
WAN Xiufu, XU Hongyu, HE Feng, et al. Effects of irrigation frequency on water consumption pattern and yield of *Medicago sativa*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(34): 153 - 158. (in Chinese)
[20] SENOCK R S, HAM J M. Heat balance sap flow gauge for small diameterstems[J]. Plant Cell & Environment, 2010, 16(5): 593 - 601.
[21] SENOCK R S, HAM J M. Measurements of water use by prairie grasses with heat balance sap flow gauges[J]. Journal of Range Management, 1995, 48(2): 150 - 158.
[22] BETHENOD O, KATERJI N, GOUJET R, et al. Determination and validation of corn crop transpiration by sap flow measurement under field conditions[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2000, 67(3 - 4): 153 - 160.
[23] BCHIR A, BOUSSADIA O, LEMEUR R, et al. Sap flow measurement compared to Penman - Monteith and Priestley - Taylor formulas in olive orchards (*Olea europaea* L. 'Chemlali') [J]. Acta Horticulturae, 2013, 991: 367 - 371.
[24] LUBCZYNSKI M W, CHAVARRO-RINCON D, ROY J. Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients in sap flow measurements. Part 1. Theory and application[J]. Tree Physiology, 2012, 32(7): 894 - 912.
[25] MELLANDER P E, BISHOP K, LUNDMARK T. The influence of soil temperature on transpiration: a plot scale manipulation in a young Scots pine stand[J]. Forest Ecology & Management, 2004, 195(1): 15 - 28.
[26] LIU X Z, KANG S Z, LI F S. Simulation of artificial neural network model for trunk sap flow of *Pyrus pyrifolia*, and its comparison with multiple-linear regression[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 939 - 945.
[27] XU X Y, TONG L, LI F S, et al. Sap flow of irrigated *Populus alba* var. pyramidalis and its relationship with environmental factors and leaf area index in an arid region of Northwest China[J]. Journal of Forest Research, 2011, 16(2): 144 - 152.
[28] 龚道枝,康绍忠,佟玲,等. 分根交替灌溉对土壤水分分布和桃树根茎液流动态的影响[J]. 水利学报, 2004(10): 112 - 118.
GONG Daozhi, KANG Shaozhong, TONG Ling, et al. Effects of root-divided alternative irrigation on soil moisture distribution and root-trunk sap flow dynamics of peach trees[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(10): 112 - 118. (in Chinese)
[29] 姜雪连. 西北旱区制种玉米父本母本耗水特性及蒸发蒸腾量估算方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2016.
JIANG Xuelian. Characteristics of water consumption of female and male parents and evaportranspiration modeling of maize for seed production in an arid region of Northwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[30] 白岩,朱高峰,张琨,等. 基于树干液流及涡动相关技术的葡萄冠层蒸腾及蒸散发特征研究[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7821 - 7831.
BAI Yan, ZHU Gaofeng, ZHANG Kun, et al. Research of transpiration and evapotranspiration from a grapevine canopy combining the sap flow and eddy covariance techniques[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7821 - 7831. (in Chinese)
[31] 刘海启. 我国制种产业发展现状及战略选择[J]. 中国农业资源与规划, 2015, 36(1): 9 - 14.
LIU Haiqi. Current situation of the development of maize seed industry in China and the strategic choice[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(1): 9 - 14. (in Chinese)
[32] 康绍忠,蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京:中国农业出版社, 1996.
[33] 洪明,朱航威,穆哈西,等. 不同滴头流量及灌水定额下红枣树耗水规律[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 72 - 77, 109.
HONG Ming, ZHU Hangwei, MU Haxi, et al. The water consumption rule of jujube trees under different emitter flow rate and irrigation quota[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 72 - 77, 109. (in Chinese)
[34] MA S M, TONG L, KANG S Z, et al. Optimal coupling combinations between dripper discharge and irrigation interval of maize for seed production under plastic film-mulched drip irrigation in an arid region[J]. Irrigation Science, 2022, 40: 177 - 189.

(下转第 438 页)

2018,33(4):919 - 929.
LIU Jilong, XIAO Fei, MAI Zhiqin, et al. Hybrid position-sensorless control scheme for PMSM based on combination of IF control and sliding mode observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(4):919 - 929. (in Chinese)
[16] 黄皓,涂群章,蒋成明,等. 基于扰动观测器的农用驱动电机变速滑模控制[J]. 农业机械学报,2022,53(7):447 - 458.
HUANG Hao, TU Qunzhang, JIANG Chengming, et al. Variable speed sliding mode control of agricultural drive motor based on disturbance observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 447 - 458. (in Chinese)
[17] 邓国发,王辉,吴轩,等. 一种可抑制逆变器非线性影响的永磁同步电机无位置传感器控制策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(24):7381 - 7390, 7464.
DENG Guofa, WANG Hui, WU Xuan, et al. A sensorless control strategy of permanent magnet synchronous motor for suppressing nonlinear effects of inverter[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2018, 38(24): 7381 - 7390, 7464. (in Chinese)
[18] XU W, JUNEJO A K, LIU Y, et al. An efficient anti-disturbance sliding-mode speed control method for PMSM drive systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(6):6879 - 6891.
[19] KE D, WANG F, HE L, et al. Predictive current control for PMSM systems using extended sliding mode observer with Hurwitz-based power reaching law[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(6):7223 - 7232.
[20] WU X, HUANG S, LIU K, et al. Enhanced position sensorless control using bilinear recursive least squares adaptive filter for interior permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,35(1):681 - 698.
[21] SHENG L, LI W, WANG Y, et al. Sensorless control of a shearer short-range cutting interior permanent magnet synchronous motor based on a new sliding mode observer[J]. IEEE Access, 2017,5:18439 - 18450.
[22] BARTOSZEWICZ A, LESNIEWSKI P. New switching and nonswitching type reaching laws for SMC of discrete time systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016,24(2):670 - 677.
[23] FALLAHA C J, SAAD M, KANAAN H Y, et al. Sliding-mode robot control with exponential reaching law[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011,58(2):600 - 610.
[24] XIONG X, KIKUUWE R, KAMAL S, et al. Implicit-Euler implementation of super-twisting observer and twisting controller for second-order systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Ⅱ: Express Briefs, 2020,67(11):2607 - 2611.
[25] LIANG D, LI J, QU R, et al. Adaptive second-order sliding-mode observer for PMSM sensorless control considering VSI nonlinearity[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018,33(10):8994 - 9004.
[26] ZHANG T, XU Z, LI J, et al. A third-order super-twisting extended state observer for dynamic performance enhancement of sensorless IPMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020,67(7):5948 - 5958.

(上接第 406 页)

[35] 刘梅先,杨劲松,李晓明,等. 膜下滴灌条件下滴水量和滴水频率对棉田土壤水分分布及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3203 - 3210.
LIU Meixian, YANG Jinsong, LI Xiaoming, et al. Effects of irrigation amount and frequency on soil water distribution and water use efficiency in a cotton field under mulched drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3203 - 3210. (in Chinese)
[36] 王允喜,李明思,蓝明菊. 膜下滴灌土壤湿润区对田间棉花根系分布及植株生长的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 31 - 38.
WANG Yunxi, LI Mingsi, LAN Mingju. Effect of soil wetting pattern on cotton-root distribution and plant growth under plastic mulched drip irrigation in field[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 31 - 38. (in Chinese)
[37] 王秀康,李援农,邢英英,等. 滴头流量对夏玉米根系的影响[J]. 中国农村水利水电, 2010(11): 66 - 68.
WANG Xiukang, LI Yuannong, XING Yingying, et al. Effect of dripper discharge on summer maize-root distribution[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(11): 66 - 68. (in Chinese)
[38] 康跃虎,王凤新,刘士平,等. 滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 66 - 72.
KANG Yuehu, WANG Fengxin, LIU Shiping, et al. Effects of water regulation under drip irrigation on potato growth[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 66 - 72. (in Chinese)
[39] WANG X K, LI Z B, XING Y Y. Effects of dripper discharge and irrigation frequency on growth and yield of maize in Loess Plateau of Northwest China[J]. Pakistan Journal of Botany, 2014, 46(3): 1019 - 1025.
[40] 李菊,张富仓,王艳丽,等. 灌水量和滴灌频率对甘肃省河西地区春玉米生长和水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 8 - 20.
LI Ju, ZHANG Fucang, WANG Yanli, et al. Effects of irrigation amount and drip irrigation frequency on spring maize growth and water use in Hexi area of Gansu Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(10): 8 - 20. (in Chinese)